

**Список литературы:** 1. Машиностроение. Энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. IV-3. Надежность машин [В.В.Клюев, В.В.Болотин, Ф.Р.Соснин и др.]. – 592 с. 2. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Межгосударственный стандарт ГОСТ 533-2000 / Международная электротехническая комиссия (МЭК-34-3-88). – К.: 2002. – 28 с. 3. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002-89. – М.: 1990. – 38 с. 4. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. ГОСТ 27.003-90. – М.: 1991. – 27 с. 5. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: 1982. – 352 с. 6. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.: 1986. – 248 с. 7. Быков В.М., Глебов И.А. Научные основы анализа и прогнозирования надежности генераторов. – Л.: 1988. – 252 с. 8. Станиславский Л.Я., Гаврилов Л.Г., Остерник Э.С. Вибрационная надежность мощных турбогенераторов. – М.: 1985. – 240 с. 9. Остерник Э.С. Моделирование деформационных полей в электромашиностроении с помощью функций *N*-переменных // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Тем. выпуск «Динамика и прочность машин». – 2003. – № 8, т. 3. – С. 29-42. 10. Остерник Э.С. О зависимости вибрации турбогенераторов от режимных параметров // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Тем. выпуск «Динамика и прочность машин». – 2010. – № 69. – С. 108-112. 11. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов... Межгосударственный стандарт ГОСТ 25364-97. – К.: 1999. – 6 с. 12. Карымов А.А. Нормирование вибрации турбогенераторов // Электротехническая промышленность. Электрические машины. – 1989. – № 10. – С. 23-25.

*Поступила в редколлегию 22.06.2011.*

УДК 539.3

**Э.А. СИМСОН**, д-р техн. наук, профессор, директор по исследованиям и разработкам, ОИЦ ЧАО «У.П.Э.К.», Харьков;

**В.В. ОБЧАРЕНКО**, канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательского подразделения, ОИЦ ЧАО «У.П.Э.К.», Харьков;

**В.И. ДЕМИДОВ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ОИЦ ЧАО «У.П.Э.К.», Харьков;

**И.Д. ПРЕВО**, науч. сотр., ОИЦ ЧАО «У.П.Э.К.», Харьков;

**С.А. НАЗАРЕНКО**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **ХОЛОДНАЯ РАСКАТКА ЗАГОТОВОК ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ**

Для процесу холодного ізотермічного розкочування розроблена математична модель, що дозволяє за допомогою чисельних методів прогнозувати напружено-деформований стан інструменту (оправки). Для існуючого технологічного процесу проведено аналіз стійкості оправок і обґрунтована правильність вибраних технологічних параметрів. На підставі чисельних експериментів запропоновано методи підвищення ресурсу інструменту.

For the process of isothermal cold ring-rolling mathematical model using numerical methods to predict the stress-deformed state of the tool (mandrel) was developed. The stability of the mandrel with existing technological process was analyzed and the correctness of the chosen process parameters was justified. On the basis of numerical experiments were proposed methods to improve the tool life.

Для процесса холодной изотермической раскатки разработана математическая модель, позволяющая с помощью численных методов прогнозировать напряженно-деформируемое состояние

инструмента (оправок). Для существующего технологического процесса проведен анализ стойкости оправки и обоснована правильность выбранных технологических параметров. На основании численных экспериментов предложены методы повышения ресурса инструмента.

**Введение.** Применение в производстве прогрессивных способов обработки металлов позволяет существенно повысить производительность труда, снизить затраты на инструмент, уменьшить отходы производства. Требования повышения качества, надежности и долговечности работы деталей в машине и машины в целом, в значительной степени определяются физико-механическими и геометрическими характеристиками металлов и поверхностей обрабатываемых деталей. Именно качество рабочих поверхностей практически во всех случаях предопределяет важнейшие эксплуатационные свойства деталей – прирабатываемость, износостойкость, сопротивление схватыванию и др. Более 80 % деталей машин и приборов выходят из строя по причине износа и потери эксплуатационных качеств. Накатывание как метод пластического деформирования металла в последнее время развивался при участии таких ученых, как К.Н. Богоявленский, М.И. Писаревский, Ю.А. Миропольский, Э.В. Рыжов, А.В. Королев и другие. Накатывание профильных элементов деталей по сравнению с их нарезанием имеет следующие преимущества: экономия металла, повышение производительности труда, точности и долговечности обрабатываемых деталей, уменьшение расходов на инструмент, экономии производственных площадей. Точность профильных элементов, изготовленных накатыванием, в большинстве случаев не ниже точности, получаемой резанием.

Процесс холодной раскатки заготовок подшипниковых колец, который пришел на замену процессу резания, полностью отвечает высоким требованиям, предъявляемым в настоящее время к технологическим процессам. Зарубежный опыт таких фирм, как «Form-flow» (Англия); «Profiroll» (Германия); «Stank-exam» (Испания); «Nixon spindle» (Франция), показывает высокую эффективность использования технологии холодной раскатки.

Для изготовления широкой номенклатуры колец шариковых подшипников на АО «ХАРП» был внедрен технологический процесс холодной раскатки, реализованный на станках URWA-100 и URWA-250 фирмы Profiroll (Profiroll Technologies GmbH, Германия). Согласно набранной статистике выхода из строя специализированного инструмента (оправок), являющейся самой нагруженной частью станка, было установлено, что на настоящий момент одна оправка в среднем выдерживает около 1000 циклов раскатки. В то время как согласно данным производителя оборудования стойкость раскатного инструмента для технологических процессов, утвержденных производителем оборудования, должна быть на порядок выше – около 15000 циклов раскатки.

**Постановка проблемы.** Целью проведения научно-исследовательских работ являлось обоснование выбранных технологических параметров раскатки, определение соответствующих норм стойкости и путей их достижения.

Характерной особенностью процесса изотермической раскатки является локальный очаг деформации со сложным напряженно-деформированным состоянием. Постановка задачи осложняется невозможностью упрощения математической модели и приведения ее к плоской или осесимметричной в связи с наличием фактора постоянно смещающегося по спирали от центра заготовки к периферии локального очага деформации и присутствия внеконтактной деформации. Поэтому компьютерное моделирование процесса возможно только в постановке объемного напряженно-деформированного состояния.

**Математическое моделирование** процесса раскатки проводилось с помощью метода конечных элементов. Достоверность математического моделирования процесса раскатки обуславливалась следующими факторами: построение твердотельной модели в соответствии с предоставленной конструкторской документацией; адекватность конечно-элементного разбиения; свойства материалов раскатного инструмента и заготовки (диаграмма деформирования для характерных скоростей деформирования); технологические параметры процесса раскатки (скорость вращения раскатного ролика, скорость перемещения прокатных салазок, коэффициент раскатки, траектория перемещения раскатных салазок); учет влияния смазывающе-охлаждающей жидкости.

Для определения критериев стойкости и путей увеличения ресурса инструмента была предложена расчетная схема, включающая следующие этапы:

1. Решение нестационарной задачи деформирования (раскатки) кольца с целью определения контактных давлений в паре оправка-заготовка и усилия раскатки. Заготовка рассматривалась как пластично деформируемое тело, оправка и ролик – как абсолютно жесткие тела.
2. Определение влияния технологических и конструктивных факторов на контактные давления в паре оправка-заготовка и усилие раскатки.
3. Решение стационарной задачи деформирования упругой оправки с определением интенсивности напряжений  $\sigma_i$  и главных напряжений (изотропная модель материала).
4. Прогнозирование длительной прочности с определением количества циклов работы инструмента.

Геометрическая модель инструмента и заготовки для процесса раскатки кольца 317A.01 представлена на рис. 1.

**Практическое применение.** Применяемые в технологическом процессе материалы: заготовка – сталь подшипниковая ШХ15; оправка – инструментальная быстрорежущая сталь Р6М5; ролик раскатной – инструментальная сталь Х12М. Физико-механические характеристики применяемых материалов были заданы на основании данных, приведенных в [1,2,3]. Технологические параметры процесса раскатки были заданы в соответствии с операционной картой изготовления кольца 317A.01: скорость прокатных салазок  $V=1,5$

мм/сек; скорость вращения раскатного ролика  $n=350$  об/мин.

Влияние смазывающе-охлаждающей жидкости учитывалось введением потерь на трение между всеми контактирующими элементами технологической системы (оправка-заготовка-ролик). Согласно проведенным исследованиям [4], эффекты трения при раскатке подчиняются закону Зибеля

$$\sigma_{mp} = m_u \sigma_c, \quad (1)$$

где  $\sigma_{mp}$  – напряжение трения;  $m_u$  – показатель трения;  $\sigma_c$  – сдвиговое сопротивление деформации. Показатель трения для холодной раскатки [4] принимается равным  $m_u = 0,12$ . Процесс раскатки считается изотермическим без учета изменения температуры в системе за счет пластических деформаций и трения. Для приведенных выше исходных данных было проведено решение нестационарной задачи раскатки кольца с целью определения контактных давлений в паре оправка-заготовка и усилия раскатки. После чего была решена стационарная задача деформирования оправки с определением поля напряжений (рис. 2).

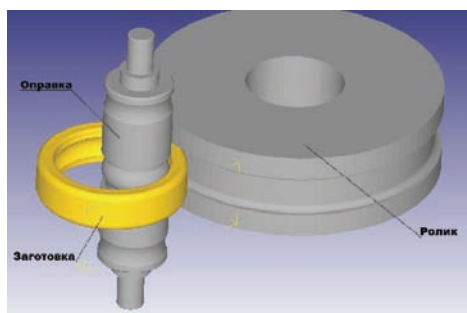


Рисунок 1

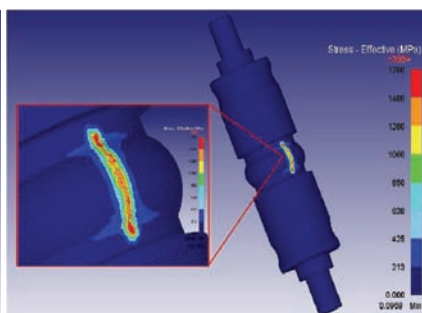


Рисунок 2

Максимальная интенсивность напряжений находится в местах перехода сферической части инструмента в цилиндрическую и составляет  $\sigma_{max} = 1820$  МПа. Коэффициент запаса прочности в данном случае составляет  $K = 1,26$ . Учитывая результаты расчета и заключения заводской лаборатории, можно сделать вывод, что разрушение оправки происходит не по причине высоких рабочих напряжений на инструменте, а вследствие усталостных явлений. В случае использования модели прогнозирования износа, в рамках которой количество циклов до износа является функцией отношения интенсивности напряжений, возникающих в детали [5], к пределу прочности на изгиб, максимальные напряжения на инструменте играют ключевую роль в определении ресурса. Для графика, на котором по оси абсцисс отложено количество циклов до износа в логарифмической шкале, а по оси ординат – напряжение в рабочем диапазоне напряжений, искомая зависимость отображается прямой. Таким образом, можно считать, что количество циклов до износа растет экспоненциально с уменьшением напряжения.

Для определения влияния изменения скорости подачи на напряжения,

возникающие в инструменте, и его стойкость было предусмотрено проведение численных экспериментов с варьированием поступательной скорости оправки. Остальные исходные данные соответствуют данным, приведенным ранее. Поступательная скорость оправки варьировалась в технологически обоснованных пределах:  $V = 1,125 \dots 2,25$  мм/сек.

Графики зависимости максимального усилия раскатки, времени операции, интенсивности напряжений на инструменте от скорости прокатных салазок приведены на рис. 3-5.

Необходимо отметить, что меньшая подача, будет способствовать повышению стойкости инструмента, однако с другой стороны это снижает скорость обработки деталей и сокращает производительность.

Изменение ресурса прогнозировалось с использованием кривой многоциклового усталости (рис. 6), которая определяется уравнением:

$$\sigma_i^m N = \text{const}. \quad (2)$$

Для типичных видов напряженного состояния и условий нагружения показатель степени  $m$  равен 6-8. В соответствии с [5] для быстрорежущей инструментальной стали Р6М5 характерен показатель степени многоциклового усталости, равный 7. Для напряженного состояния оправок, соответствующих скоростям  $V_1 = 1,25$  мм/сек и  $V_2 = 1,5$  мм/сек, характерно различное ожидаемое число циклов до разрушения. В соответствии с формулой (2)

$$N_2/N_1 = (\sigma_{i1}/\sigma_{i2})^m = 1,09^7 = 1,83.$$

Таким образом, снижение скорости подачи прокатных салазок до  $V_1 = 1,25$  мм/сек должно приводить к увеличению ресурса в 1,83 раза.

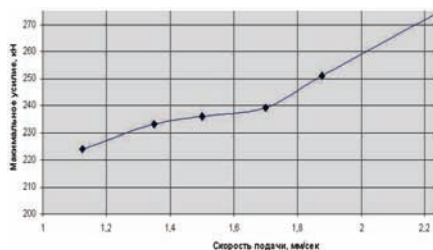


Рисунок 3

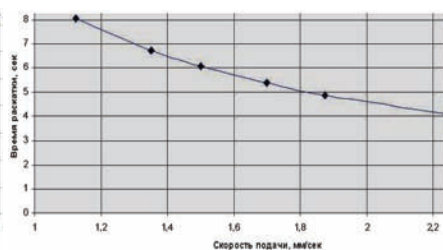


Рисунок 4

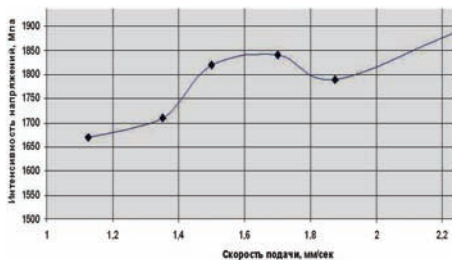


Рисунок 5

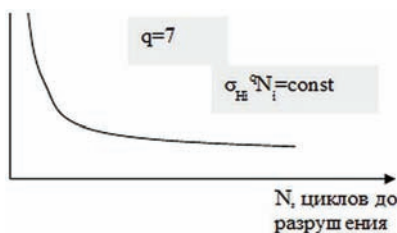


Рисунок 6

**Заключение.** На основании проведенных численных исследований можно сделать следующие выводы. Технологические параметры процесса раскатки, принятые в качестве исходных, обеспечивают необходимую стойкость инструмента и не могут быть причиной его поломок. Следовательно, причинами повышенного отказа инструмента (оправок) являются неверные режимы термической и механической обработки инструмента, которые, в частности, могут быть причиной либо высоких остаточных напряжений, либо прочностные свойства инструмента являются заниженными. В то же время ресурс раскатного инструмента используется не в полной мере, в частности, снижение скорости подачи в 1,2 раза (увеличение времени раскатки в 1,4 раза) позволит увеличить ресурс инструмента в 1,83 раза.

**Список литературы:** 1. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гунн, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с. 2. Колосков М.М. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с. 3. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка / И. Артингер. – М.: Металлургия, 1982. – 312с. 4 Yang H. Role of Friction in Cold Ring Rolling / H. Yang // Journal of Materials Sciences and Technology. – 2005. – Vol. 21, № 6. – P. 914-920. 5. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие в 4-х томах. Том 4. / Под ред. Панасюка В.В. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с.

*Поступила в редколлегию 05.06.2011*

УДК 593.3

**В.Н. СОБОЛЬ**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., НТУ «ХПИ»

## **СМЕШАННЫЙ ВАРИАЦИОННЫЙ ФУНКЦИОНАЛ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ НАЧАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ**

Для розв'язування початково-крайових задач динамічної повзучості початково-анізотропних тіл застосовано змішаний варіаційний функціонал. Стационарні умови для функціоналу відшукуються за подовженням у часі розв'язків, які прийняті за варіаційно-структурним методом теорії R-функцій. Рівняння стану динамічної повзучості матеріалів конкретизовані відносно швидкостей незворотних деформацій повзучості та пошкоджень. Чисельні оцінки ресурсу отримані для циліндра під внутрішнім тиском, що пошкоджується внаслідок динамічної повзучості.

A mixed variational functional have been used for solution of initial-boundary-value problem of dynamic creep for initial-anisotropic bodies. Variational-structural R-functions theory method in combination with the method of solutions continuation over time are presented in the paper. State equations of dynamic creep for materials are specified in incremental form relative to irreversible creep strains rates and damage parameter. As an example, numerical estimations of dynamic creep-damage problem for the cylinder under internal pressure are given.

Для решения начально-краевых задач динамической ползучести начально-анизотропных тел применен смешанный вариационный функционал. Стационарные условия для функционалу оты-